

**А. В. Желнина<sup>1,2\*</sup>, А. Г. Илларионов<sup>2</sup>, М. С. Калиенко<sup>1,2</sup>,  
А. А. Попов<sup>2</sup>, Н. В. Щетников<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ПАО «Корпорация ВСПО-АВИСМА», г. Верхняя Салда

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

\*avzhelnina@gmail.com

Научный руководитель — проф., д-р техн. наук А. А. Попов

## **ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Ti-10V-2Fe-3Al**

В работе исследовано влияние содержания углерода на микроструктуру и механические свойства переходного ( $\alpha+\beta$ )-титанового сплава Ti-10V-2Fe-3Al в термоупрочненном состоянии. Установлено, что с увеличением содержания в сплаве углерода до предела его растворимости в твердом растворе прочность сплава растет, пластические характеристики снижаются. При превышении предела растворимости углерода в твердом растворе в сплаве наблюдается появление частиц карбида на основе титана, при этом прочность сплава несколько снижается, что обусловлено уменьшением эффекта твердорастворного упрочнения от присутствующих элементов в сплаве, которые частично переходят из твердого раствора в образующиеся частицы карбида на основе титана.

*Ключевые слова:* титановые сплавы, механические свойства, упрочняющая термическая обработка, карбиды.

**A. V. Zhelnina, A. G. Illarionov, M. S. Kalienko, A. A. Popov, N. V. Schetnikov**

## **EFFECT OF CARBON CONTENT ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Ti-10V-2Fe-3Al ALLOY**

The effect of carbon content on microstructure and mechanical properties of the transition ( $\alpha+\beta$ )-titanium alloy Ti-10V-2Fe-3Al in a heat-strengthened state was studied. It was established that with the increase of carbon content in the alloy up to the limit of its solubility in a solid solution, the strength of the alloy increases, the plastic characteristics decrease. When the solubility limit of carbon in a solid solution in an alloy is exceeded, the appearance of titanium-based carbide particles was observed, while the strength of the alloy somewhat decreases, due to the decrease of the effect of solid-solution hardening from the elements present in the alloy, which are partially transferred from the solid solution to the titanium-based carbide particles.

*Key words:* titanium alloys, mechanical properties, hardening heat treatment, carbides.

## Введение

Титановый сплав  $\text{Ti-10V-2Fe-3Al}$  был разработан для изготовления высокопрочных элементов на замену стальным, что дает существенный выигрыш в весе конструкции. Сплав начали широко использовать в авиастроении в 1980-х годах для изготовления узлов шасси и нагруженных элементов планера [1]. Благодаря высокому содержанию  $\beta$ -стабилизаторов в составе сплав  $\text{Ti-10V-2Fe-3Al}$  имеет температуру полиморфного превращения существенно ниже в сравнении с таким широко используемым конструкционным сплавом, как  $\text{Ti-6Al-4V}$ , что позволяет деформировать его при меньших температурах и с меньшими усилиями [2]. Для получения окончательного комплекса механических свойств сплава  $\text{Ti-10V-2Fe-3Al}$  применяют упрочняющую термическую обработку. Путем изменения температуры старения можно изменять прочность сплава в широком диапазоне от 1000 до 1350 МПа [3]. На механические свойства сплава, помимо этого, оказывают влияние большое количество структурных параметров, которые определяются композицией сплава и термомеханическими параметрами его обработки.

В ряде работ было обнаружено, что добавление углерода в титановые сплавы оказывает положительный эффект на ряд их свойств. В частности, углерод уменьшает размер исходного  $\beta$ -зерна [4, 5], ускоряет динамику старения, повышает прочность и сопротивление ползучести [6], увеличивает упрочняющий эффект при старении [7], затрудняет образование зернограницной  $\alpha$ -фазы и стимулирует более равномерный распад при старении [8, 9]. При высоком содержании углерода образующиеся карбиды титана могут частично связывать примесь кислорода в сплаве, способствуя уменьшению содержания кислорода вблизи межзеренных границ и тем самым понижая вероятность зернограницного охрупчивания при старении [10]. Однако, как известно, карбид титана имеет высокий модуль упругости и низкую пластичность, что может и негативно повлиять на ряд механических свойств при наличии в сплаве частиц карбида титана [11]. Поэтому вопросы, касающиеся определения предельной растворимости углерода в различных титановых сплавах и влияния образующихся карбидов титана на физико-механические свойства сплавов, являются актуальными. Целью настоящей работы было определить предельную растворимость углерода в титановом сплаве  $\text{Ti-10V-2Fe-3Al}$  и исследовать влияние содержания углерода на структуру и механические свойства сплава.

## Материалы и методики эксперимента

Материалом для исследования были прутки диаметром 22 мм из сплава Ti–10V–2Fe–3Al производства ПАО «Корпорация ВСППО-АВИСМА». Проведено исследование прутков пяти составов сплава Ti–10V–2Fe–3Al с различным содержанием углерода, их химический состав, алюминиевый и молибденовый структурные эквиваленты которых, рассчитанные по формулам из справочника [12], представлены в табл. 1. После прокатки проведена упрочняющая термическая обработка (УТО): закалка в воду с температуры ( $T_{\text{пп}} - 45$ ) °С с последующим старением при температуре 530 °С.

Таблица 1

Химический состав исследованных сплавов Ti–10V–2Fe–3Al (мас. %)

| Сплав | C     | O    | Al <sub>стр.экр.</sub> | Mo <sub>стр.экр.</sub> |
|-------|-------|------|------------------------|------------------------|
| S1    | 0,008 | 0,11 | 4,3                    | 11,10                  |
| S2    | 0,022 | 0,10 | 4,37                   | 11,07                  |
| S3    | 0,031 | 0,10 | 4,44                   | 10,99                  |
| S4    | 0,034 | 0,10 | 4,49                   | 11,30                  |
| S5    | 0,063 | 0,10 | 4,73                   | 11,27                  |

Были определены механические свойства образцов сплава при испытании на растяжение при комнатной температуре на разрывной машине Zwick в соответствии со стандартом ASTM-E8.

Исследование микроструктуры и фрактографическое исследование изломов образцов после испытаний проводили на электронном микроскопе Quanta 3D FEG с детектором EDAX Genesis 2000.

## Результаты исследований и их обсуждение

Микроструктура горячекатаных прутков сплава Ti–10V–2Fe–3Al с минимальным и максимальным алюминиевым эквивалентом ( $Al_{\text{стр.экр.}}$ ) после прокатки представлена на рис. 1.

В структуре образцов присутствует первичная глобулярная  $\alpha$ -фаза и мелкодисперсная вторичная  $\alpha$ -фаза в  $\beta$ -матрице, которая образуется при охлаждении. При исследовании образцов в режиме обратнорассеянных электронов в структуре сплава с максимальным содержанием углерода обнаружены частицы третьей фазы, имеющие равноосную форму, похожую на глобулы первичной  $\alpha$ -фазы, но с более темным контрастом (рис. 1). Такой темный контраст свидетельствует о большем со-

держании в ней элементов с меньшим атомным номером по сравнению с  $\alpha$ -фазой. Следует так же отметить, что темные равноосные частицы наблюдаются как на первичной  $\alpha$ -фазе, так и в  $\beta$ -матрице.

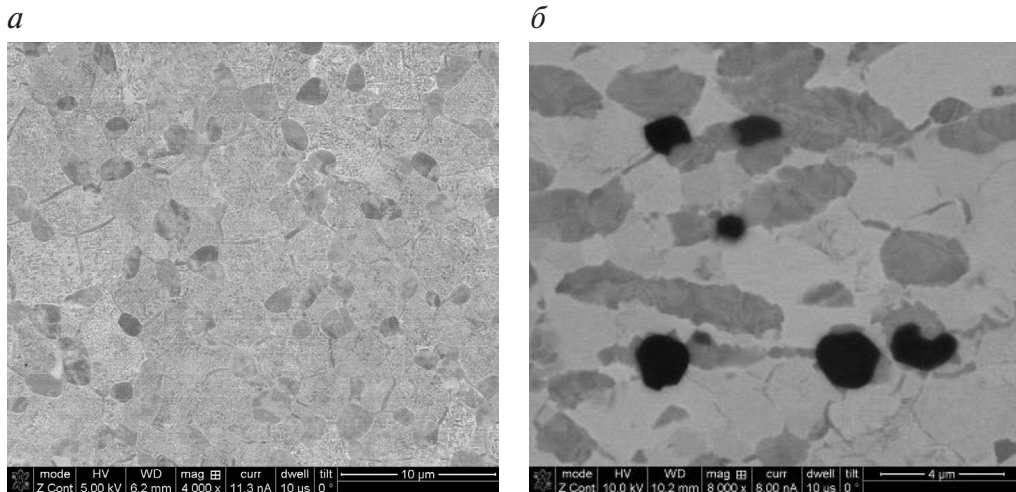


Рис. 1. Микроструктура прутков сплава Ti–10V–2Fe–3Al после горячей прокатки:  
а — сплав S1; б — сплав S5

На рис. 2 представлена микроструктура образцов сплава после УТО. Наблюдавшиеся после горячей прокатки частицы третьей фазы сохраняются. Старение способствует равномерному выделению дисперсных вторичных  $\alpha$ -частиц в теле  $\beta$ -зерна (рис. 2, а). В табл. 2 представлен химический состав частиц третьей фазы, полученный методом микро-рентгеноспектрального анализа (МРСА). Сравнительный анализ содержания элементов в спектрах частицы и матрицы позволяет отнести данные частицы к карбиду на основе титана. Исходя из данных литературы [13, 14] — это карбид типа  $\text{TiC}_x$  ( $x = 0,3...1$ ). Меньшее по сравнению со стехиометрией карбида  $\text{TiC}_x$  содержание углерода, полученное в анализируемой частице, очевидно связано с ее относительно малыми размерами (менее 2 мкм), что приводит к получению заниженных значений в ней содержания углерода из-за частичной «подсветки» матрицы при проведении МРСА. В образцах других плавок с меньшим содержанием углерода такого рода частицы обнаружены не были.

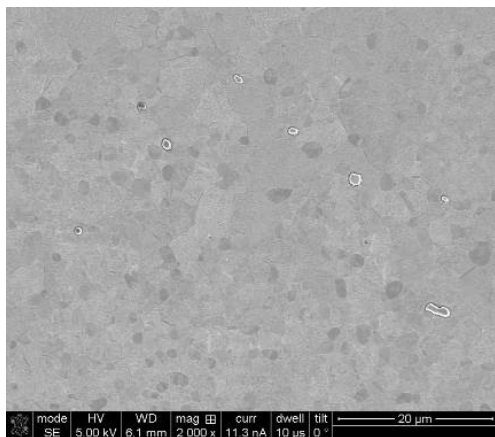
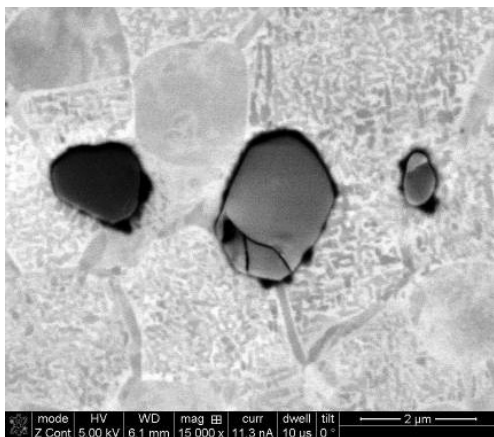
*a**б*

Рис. 2. Микроструктура образца сплава Ti–10V–2Fe–3Al (0,063 мас. % C) после УТО, методом РЭМ:

*a* — контраст во вторичных электронах; *б* — контраст в обратно-рассеянных электронах

Таблица 2

**Химический состав (EDS) образца Ti–10V–2Fe–3Al (0,063 мас. % C)**

| Химический элемент | Область анализа, состав в вес. (ат.) % |                 |
|--------------------|--|-----------------|
|                    | Частица третьей фазы                   | Основной металл |
| C                  | 4,8 (16,6)                             | – (–)           |
| Al                 | 1,53 (2,35)                            | 2,86 (5,01)     |
| Ti                 | 88,02 (76,46)                          | 85,6 (84,4)     |
| V                  | 4,69 (3,83)                            | 9,67 (8,97)     |
| Fe                 | 0,97 (0,73)                            | 1,87 (1,58)     |
| Total              | 100 (100)                              | 100 (100)       |

Механические свойства прутков сплава после УТО представлены на рис. 3. С повышением содержания углерода от 0,008 до 0,034 мас. % предел текучести возрастает с 1016 до 1095 МПа, относительное удлинение снижается с 19 до 16 %. При содержании углерода 0,063 мас. % предел текучести оказался ниже, чем при 0,034 мас. %, составив 1078 МПа, при более высоком относительном удлинении 17 %. Такое поведение свойств при образовании частиц карбида мы связываем с переходом части легирующих элементов (Al, V, Fe) из твердых растворов ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) в сплав в карбид и, соответственно, уменьшением их вклада в твердо-растворное упрочнение. Кроме того, как отмечено выше в работе [10], при образовании в структуре карбида на основе титана он может частично связывать и примесь кислорода, способствуя некоторому повышению пластичности, что мы так же фиксируем.

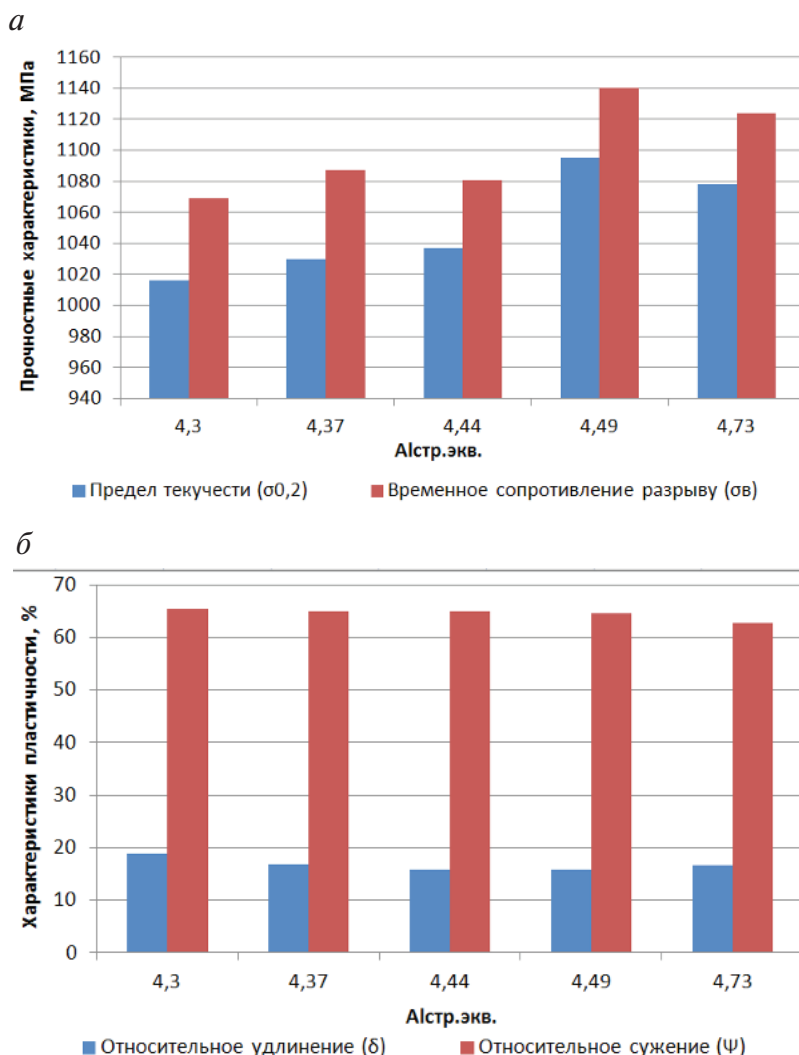


Рис. 3. Графики зависимости механических свойств сплава Ti–10V–2Fe–3Al в зависимости от содержания  $\alpha$ -стабилизаторов:

*a* — предел текучести и временное сопротивление; *б* — относительное удлинение и сужение

Было так же проведено фрактографическое исследование изломов образцов после испытания на растяжение сплавов, содержащего карбиды на основе титана (рис. 4) и без них.

Изломы исследованных образцов вязкие по типу конус-чашечка. Существенных отличий между образцами при фрактографическом исследовании не выявлено.



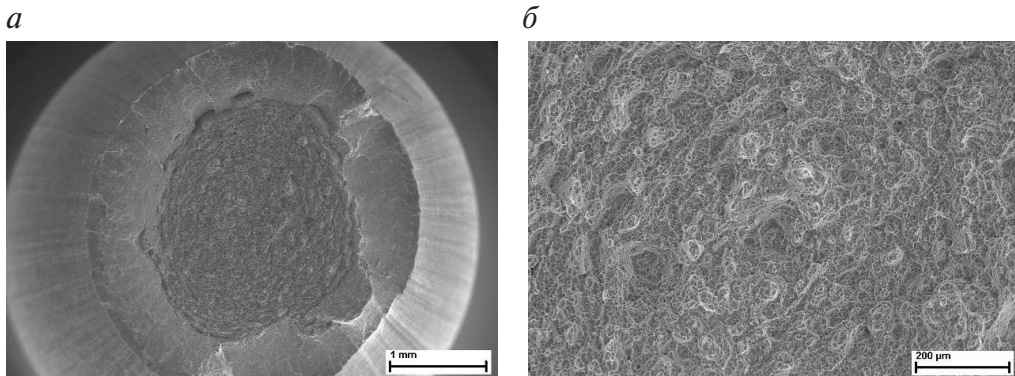


Рис. 4. Структура излома сплава Ti–10V–2Fe–3Al (0,063 мас. % C) после испытания на растяжение при разных увеличениях

## Заключение

Проведено исследование влияния различного содержания углерода на микроструктуру и механические свойства титанового сплава Ti–10V–2Fe–3Al. По результатам работы сделаны следующие выводы:

С увеличением содержания углерода с 0,008 до 0,034 мас. % в сплаве до начала выделения карбидной фазы прочностные свойства после УТО возрастают, пластические снижаются.

При концентрации углерода на уровне 0,063 мас. % в сплаве наблюдается выделение карбида титана типа  $TiC_x$  и фиксируется некоторое снижение прочностных свойств по сравнению со сплавом с 0,034 мас. %, связанное с уменьшением эффекта твердорастворного упрочнения от присутствующих элементов в сплаве, которые частично переходят из твердого раствора в образующиеся частицы карбида.

После горячей деформации сплава в  $(\alpha+\beta)$ -области частицы карбидной фазы имеют равноосную форму, сходную с глобулярной морфологией первичных  $\alpha$ -выделений.

Присутствие карбидов титана в сплаве не изменяет характер излома образцов после испытаний на растяжение в термоупрочненном состоянии.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 State of the art in beta titanium alloys for airframe applications / J. D. Cotton [et al.] // JOM. 2015. V. 67. № 6. P. 1281–1303.
- 2 Chen C. C., Boyer R. R. Practical considerations for manufacturing high strength Ti-10V-2Fe-3Al forgings // JOM. 1979. V. 31. P. 33–39.
- 3 Boyer R. R., Kuhlman G. W. Processing properties relationships of Ti-10V-2Fe-3Al // Metallurgical and Materials Transactions A. 1987. V. 18A. P. 2095–2103.

- 4 Effect of boron and carbon addition on microstructure and mechanical properties of metastable beta titanium alloys / R. Banoth [et al.] // *Materials and Design*. 2015. V. 67. P. 50–63.
- 5 Role of titanium carbides on microstructural evolution of Ti-35V-15Cr-0.3Si-0.1C alloy during hot working / S. Zhang [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. V. 684. P. 201–210.
- 6 Szkliniarz A. Microstructure and Properties of Beta 21S Alloy with 0.2 wt. % of Carbon // *Solid State Phenomena*. 2016. V. 246. P. 19–24.
- 7 The influence of oxygen and carbon-content on aging of Ti-15–3 / J. Del Prado [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2005. V. 14. № 6. P. 728–734.
- 8 Effect of boron and carbon addition on microstructure and mechanical properties of Ti-15–3 alloy / R. Sarkara [et al.] // *Materials Science and Engineering A*. 2011. V. 528. P. 4819–4829.
- 9 Effect of carbon additions on microstructure and mechanical properties of Ti-15–3Z / Q. Chen [et al.] // *Materials Science and Technology*. 2004. V. 20. P. 343–349.
- 10 Effect of carbon and oxygen on microstructure and mechanical properties of Ti-25V-15Cr-2Al alloy / Y. G. Li [et al.] // *Acta Materialia*. 1999. V. 47. P. 2889–2905.
- 11 Impacts of trace carbon on the microstructure of as-sintered biomedical Ti–15Mo alloy and reassessment of the maximum carbon limit / M. Yan [et al.] // *Acta Biomaterialia*. 2014. V. 10. P. 1014–1023.
- 12 Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства : справ. М. : ВИЛС–МАТИ, 2009. 520 с.
- 13 Trace carbon in biomedical beta-titanium alloys: recent progress / D. Zhao [et al.] // *JOM*. 2015. V. 67. № 10. P. 2236–2243.
- 14 Predel B. C-Ti (Carbon-Titanium) // *Landolt-Bornstein-Group IV Physical Chemistry*. 2012. V. 12B. P. 147–149.